

На правах рукописи

Грибанов Константин Геннадьевич

Разработка методов определения атмосферных параметров по
результатам измерения теплового излучения Земли.

Специальность 01.04.14
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук.

Екатеринбург 2002

Работа выполнена в Уральском государственном университете им. А.М.Горького и Свердловском филиале научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники.

Научные руководители :	доктор физико-математических наук, профессор Борисов С.Ф. кандидат физико-математических наук Захаров В.И.
Официальные оппоненты :	доктор физико-математических наук Фомин Б.А. кандидат физико-математических наук Береснев С.А.
Ведущая организация :	Институт оптики атмосферы Сибирского отделения РАН, г.Томск

Защита состоится «___»_____2002г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.286.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в Уральском государственном университете им. А.М. Горького по адресу: г.Екатеринбург, К-83, пр. Ленина 51, комн.248.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Автореферат разослан «___»_____2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических
наук,с.н.с

Баранов Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В минувшем столетии замечено постепенное повышение температуры Земли. Это связывают с повышением концентрации CO_2 в атмосфере произошедшего в результате индустриальной активности человека. Если в середине XIX века концентрация двуокиси углерода составляла 280 миллионных долей, то в настоящее время данная величина приближается к 400-м миллионным долям. Однако оценки влияния повышения концентрации CO_2 на повышение средней приповерхностной температуры воздуха противоречивы [1,2] и это обусловлено такими факторами как неполнота массива наблюдений, несовершенство методик наблюдения, многофакторность изменений климата и недостаточная адекватность численных моделей. Для того, чтобы оценить влияние роста концентрации CO_2 на климат, создано несколько моделей от относительно простых энергобалансовых моделей нулевой размерности до сеточных моделей общей циркуляции атмосферы [3], включающих в себя различные модели океана, топографии и реакции криосферы. Климатический эффект от удвоения концентрации углекислого газа в разных моделях колеблется от 0.3 до 3.9 К. Температура воздуха и её глобальные характеристики играют важную роль в проблеме CO_2 – климат. Кроме того, CO_2 не единственный парниковый газ, концентрация которого растет в результате деятельности человека. Такие газы как метан (CH_4), фреоны, тропосферный озон также ответственны за глобальное потепление. Восстановление глобальных трехмерных распределений температуры и концентраций парниковых газов и наблюдение этих распределений в течение длительного промежутка времени могли бы существенно улучшить понимание зависимости между ростом концентраций парниковых газов и глобальным потеплением.

Технологии термического зондирования атмосферы из космоса с целью получения метеорологических параметров разрабатывается уже более 30 лет и созданию эффективной космической системы мониторинга атмосферных газов уделяется особое внимание [4,5]. До недавнего времени термическое зондирование атмосферы в надир основывалось на данных получаемых многоканальными спектрорадиометрами, регистрирующими тепловое излучение атмосферы в нескольких спектральных интервалах. Например, многоканальный спектрометр, размещенный на борту спутников GOES-8/9 [6], регистрирует ИК излучение атмосферы в 18 каналах в диапазоне $650\text{--}2800\text{ см}^{-1}$, с полушириной функции фильтра порядка $10\text{--}50\text{ см}^{-1}$.

В последнее время, в дополнение к орбитальным многоканальным спектрорадиометрам, которые регистрируют уходящее тепловое излучение атмосферы Земли в нескольких спектральных интервалах, на орбиту выводятся или планируются к запуску Фурье-спектрометры относительно высокого спектрального разрешения (до 0.1 см^{-1}) с непрерывным спектральным покрытием и направлением зондирования в надир. Первым таким прибором был IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse gases) на борту спутника ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite), запущенного Национальным космическим агентством Японии (NASDA) 17 августа 1996 года [7]. И хотя из-за поломки солнечной батареи, IMG проработал всего 8 месяцев, за это время получено большое количество тепловых спектров в спектральном интервале 600 --

3030см^{-1} (3.3 – 16.6 мкм). С одной стороны спектры более высокого разрешения должны позволять восстанавливать атмосферные параметры с большей точностью и более высоким высотным разрешением, а с другой стороны возрастает объём данных, которые следует обрабатывать, что в свою очередь, предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам, которые задействованы в восстановлении атмосферных параметров по спектрам высокого разрешения. Кроме того, рост производительности вновь выпускаемых процессоров позволяет отказаться от многих приближений и упрощений, которые были характерны для алгоритмов разработанных 10-20 лет назад. Таким образом, есть необходимость в поиске и разработке новых методов и программных инструментов для того, чтобы в полной мере оценить новые возможности орбитальных сенсоров на основе Фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения.

Цель диссертационной работы

Разработка и программная реализация методов восстановления высотных профилей температуры, влажности и концентраций парниковых газов в атмосфере Земли из тепловых спектров высокого разрешения уходящего в космос излучения системы земная поверхность – атмосфера.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается как сравнением с данными зондовых измерений и экспериментальными спектрами, так и с результатами, независимо полученными другими авторами с использованием других методик.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод восстановления высотных профилей температуры в атмосфере из спектров, полученных Фурье-спектрометрами типа IMG/ADEOS, без использования априорной информации.
2. Метод восстановления относительного содержания изотопомера воды HDO в атмосферном столбе из спектров IMG/ADEOS.
3. Метод восстановления высотных профилей метана (CH_4) из спектров IMG/ADEOS, основанный на минимизации целевой функции с ограничениями.
4. Повышение точности восстановления температуры поверхности и температурного профиля в атмосфере из ИК спектров высокого спектрального разрешения при учете отраженного теплового излучения атмосферы от поверхности Земли при зондировании экосистем, излучательная способность которых существенно меньше единицы.

Научная новизна

1. Впервые использована строгая нелинейная модель для вычисления спектра атмосферы при использовании нелинейного алгоритма восстановления вектора атмосферных параметров.

2. Впервые разработан метод определения относительного содержания изотопомера HDO в атмосферном столбе из спектров уходящего в космос теплового излучения.
3. Показана возможность восстановления высотного профиля метана из спектров уходящего в космос теплового излучения без использования априорной информации в виде ковариационной матрицы заранее измеренных профилей.
4. Впервые выявлены спектральные особенности проявления отражения нисходящего теплового излучения от поверхности Земли в спектрах уходящего в космос теплового излучения с высоким спектральным разрешением.

Практическая полезность

Результаты данной работы реализованы в программных продуктах и доступны любому исследователю через Интернет по адресу atmosphere.ug.ru. Данное программное обеспечение может быть использовано при решении следующих задач:

- моделирования спектров высокого разрешения уходящего в космос теплового излучения системы земляная поверхность – атмосфера;
- восстановления атмосферных параметров по спектрам полученным спутниковыми Фурье-спектрометрами;
- оценки зондирующих способностей существующих или разрабатываемых спутниковых сенсоров на основе Фурье-спектрометра;
- подготовке специалистов в области спутникового мониторинга в ВУЗах.

Апробация работы и реализация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на 1-ом и 2-ом Всероссийских совещаниях по природным и антропогенным катастрофам (Томск, 1991; Новосибирск, 1993); коллоквиуме ASA 93 (Реймс, Франция, 1993); XI и XII международных симпозиумах-школах по молекулярной спектроскопии высокого разрешения (Омск, 1993г.; Санкт-Петербург, 1996г.); VII международной конференции по глобальному потеплению (Вена, Австрия, 1996); 15-ом международном симпозиуме по оптике атмосферы и океана (Томск, 1998г.); на 5-ом, 8-ом и 9-ом международных симпозиумах по атмосферной науке из космоса использующей Фурье спектрометрию высокого разрешения (Токио, Япония, 1994; Тулуза, Франция, 1998г.; Киото, Япония, 2000г.); на симпозиуме ALPS 99 (Мерибел, Франция 1999г.); на 13-ом симпозиуме и школе по молекулярной спектроскопии высокого разрешения (Томск, 1999г.). Разработанное в рамках данной работы программное обеспечение используется в Национальном институте ресурсов и окружающей среды (Цукуба, Япония) и в Центре климатических исследований при университете Токио (Токио, Япония).

Публикации

По материалам выполненных исследований опубликовано 24 печатных работы в отечественной и зарубежной печати.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы. В ней содержится 103 страницы, 42 рисунка, 1 таблица и 105 ссылок на литературные источники.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* показана актуальность темы диссертации, сформулированы основные задачи исследования, описывается новый подход к решению поставленной задачи. Обзор публикаций по методам восстановления вертикальных профилей атмосферных параметров показал, что почти все разработанные методы основываются на линеаризации прямой модели и использовании априорной информации в виде ковариационной матрицы профилей полученных с помощью зондовых измерений. Эти методы критичны как к начальному приближению, так и к набору профилей, использованных при построении ковариационной матрицы. Эти методы разрабатывались для многоканальных спектрометров с относительно небольшим числом спектральных каналов. В данной работе ставилась задача разработать нелинейный алгоритм восстановления вертикальных профилей атмосферных параметров из спектров высокого спектрального разрешения на основе методов градиентного спуска и по возможности не использующий априорной информации в виде ковариационной матрицы профилей. Если для многоканальных спектрометров число восстанавливаемых параметров превышает число спектральных каналов и обратная задача является некорректной, то для Фурье-спектрометров высокого разрешения (таких как IMG/ADEOS) число спектральных каналов велико и на два-три порядка превышает число восстанавливаемых параметров.

Первая глава содержит обзор и анализ существующих методов восстановления профилей температуры, влажности и озона. Прямая модель в общем виде может быть представлена следующим образом [8]:

$$\mathbf{y} = F(\mathbf{x}) + \varepsilon_y$$

где \mathbf{y} – вектор m измеренных спектральных плотностей энергетической яркости, \mathbf{x} – вектор n восстанавливаемых параметров, ε_y – измерительный шум. При использовании многоканальных сенсоров, как правило, $m \ll n$, так что формально задача восстановления является плохо обусловленной. Обратная задача заключается в нахождении оценки вектора \mathbf{x} при известном векторе \mathbf{y} . Общий статистический подход к решения обратных задач атмосферной оптики подробно разработан в литературе за последние 30 лет (см. например [9-14]). Все разработанные методы основываются на следующей линеаризации прямой модели:

$$\delta \mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0 = \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \varepsilon_y = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \varepsilon_y,$$

где y_0 – спектр соответствующий опорному состоянию x_0 , A – матрица производных вида $\partial F_i / \partial x_j$. Статистический подход к решению обратной задачи требует знания ковариационной матрицы профилей S_d , которая зависит от выборки профилей, использованных при её построении, а также знания ковариационной матрицы ошибки измерения спектра E_b , которая является частью спецификации конкретного спектрометра. Обобщенное статистическое решение дается формулой максимального правдоподобия для линеаризованной прямой модели [10,11]

$$\delta x = S_d A^T (A S_d A^T + E_d)^{-1} \delta y.$$

Данная формула может применяться однократно или использоваться в итерационной процедуре. Точность решения зависит от близости начального приближения x_0 и набора профилей использованных при построении S_d . В [12] описан нелинейный алгоритм минимизирующий следующую целевую функцию:

$$J(x) = (x - x_0)^T S_d^{-1} (x - x_0) + [y^m - F(x)]^T E_b^{-1} [y^m - F(x)],$$

где y^m - вектор измеренных яркостей, а $F(x)$ - линеаризованная прямая модель. Многими авторами используется и метод регуляризации Тихонова (см. например [13,14]), который сводится к минимизации следующего сглаживающего функционала:

$$J(\delta x) = \|A \delta x - \delta y\|_2^2 + \alpha^2 \|L \delta x\|_2^2,$$

где α - параметр регуляризации, а L - матрица определяющая меру простоты решения, которая часто строится на основе S_d . Различными авторами используются различные способы линеаризации прямой модели, различные способы построения матрицы S_d , различные способы построения матрицы L и различные способы минимизации целевого функционала J . Объединяет все эти работы следующее: линеаризация прямой модели, необходимость создания базы данных профилей начальных приближений и учет априорной информации в виде ковариационной матрицы ранее измеренных профилей.

Вторая глава содержит описание теоретических и модельных построений, а также алгоритмов, использованных при разработке программного обеспечения названного FIRE-ARMS (Fine Infrared Explorer for Atmospheric Remote Measurements).

В данной работе отдано предпочтение интегральному представлению уравнения переноса теплового излучения в атмосфере. При наблюдении атмосферы со спутника в нади́р, выражение для спектральной плотности яркости атмосферы в общем случае в условиях чистого неба имеет вид:

$$W_v^{up} = \varepsilon_v B_v(T_0) \exp \left(- \int_0^H K_v^{abs} dh \right) +$$

$$+ (1 - \varepsilon_v) W_v^{down} \exp\left(-\int_0^H K_v^{abs} dh\right) + \quad (1)$$

$$+ \int_0^H K_v^{abs} B_v \exp\left(-\int_h^H K_v^{abs} dh'\right) dh,$$

где K_v^{abs} - коэффициент поглощения компонентами атмосферы, B_v - спектральная плотность яркости черного тела, ε_v - излучательная способность земной поверхности, H - верхняя граница атмосферы, а W_v^{down} - спектральная плотность энергетической яркости атмосферы в направлении земной поверхности. Таким образом, для случаев, когда нельзя пренебречь тем, что земная поверхность не черная, при вычислении спектра атмосферы вверх требуется знать спектр излучения атмосферы вниз. Он определяется выражением

$$W_v^{down} = \int_0^H K_v^{abs} B_v \exp\left(-\int_0^h K_v^{abs} dh'\right) dh. \quad (2)$$

Коэффициент поглощения K_v^{abs} включает в себя следующие слагаемые:

- коэффициент поглощения газовыми составляющими, который вычисляется с помощью суммирования по спектральным линиям (line-by-line) с использованием параметров известной спектральной базы данных HITRAN-96 [15];
- коэффициент ослабления аэрозольными компонентами атмосферы вычисляемый с помощью моделей и параметров приведенных в [14];
- коэффициент континуального поглощения водяным паром, вычисляемый с помощью параметризации [16].

Для случаев наклонных наблюдений с небольшим углом наклона, в выражениях (1) и (2) производится замена $dh \leftarrow \sec \theta \cdot dh$, θ - угол между осью наблюдения и вертикальной линией.

Для учета эффекта смещения линий в Q-ветвях молекулы CO_2 , использовались модели, программное обеспечение и базы данных, разработанные в [18,19]. Спектры с конечным спектральным разрешением моделируются с помощью интегральной свертки модельного спектра высокого разрешения с инструментальной функцией спектрометра. В качестве инструментальных функций спектрометров программное обеспечение позволяет использовать функции Лоренца, Гаусса, треугольную функцию, функцию $\text{Sin}(x)/x$, а также функции, специально определенные для Фурье-спектрометров и зависящие от выбора функции аподизации при Фурье-преобразовании интерферограммы [20]. Интегралы, входящие в (1) и (2) вычисляются численно с помощью алгоритма с адаптивным шагом по высоте. Фиксированное разбиение атмосферы на слои признано нецелесообразным, т.к. в этом случае точность вычисления интегралов зависят от волнового числа и может изменяться на несколько порядков, что приводит к искажению

модельных спектров. Для оптимизации вычисления модельных спектров, в данной работе разработана техника быстрого поиска узла таблицы, заданной с произвольным переменным шагом.

При восстановлении высотных профилей атмосферных параметров, в общем случае минимизируется следующая целевая функция:

$$F = \sum_{i=1}^M \left[\frac{W_i^{obs}}{W_i^{calc}} - \frac{W_i^{calc}}{W_i^{obs}} \right]^2 + \sum_{\alpha=1}^{N_p} \mu^\alpha \sum_{j=1}^N \left[\frac{p_{\alpha j}}{p_{\alpha j}^{ref}} - \frac{p_{\alpha j}^{ref}}{p_{\alpha j}} \right]^2 \frac{1}{\sigma_{\alpha j}^2}, \quad (3)$$

где W_i^{obs} - наблюдаемый, а W_i^{calc} - модельный спектры на i -ой частоте; $p_{\alpha j}$ - варьируемые профили атмосферных параметров (температуры, давления, концентраций поглощающих газов); $p_{\alpha j}^{ref}$ - опорные профили или профили начального приближения; μ^α - параметры регуляризации, не позволяющие решению удаляться слишком далеко от начального приближения; $\sigma_{\alpha j}$ - дисперсии профилей, вычисляемые с помощью набора ранее измеренных профилей; M - число спектральных каналов, N - число узлов в высотной сетке, N_α - число варьируемых профилей. Кроме того, программное обеспечение позволяет использовать регуляризующее слагаемое в (3) без использования априорной информации в виде набора $\sigma_{\alpha j}$, в этом случае $\sigma_{\alpha j} = 1, \forall \alpha, j$. Для минимизации (3) используется метод Флетчера – Ривза [21], который экономичен с точки зрения использования оперативной памяти компьютера. Данный метод подвергся модификации, связанной с физическими ограничениями, накладываемыми на атмосферные параметры. Вычисление производных (3) выполняется аналитически, при этом процедура максимально оптимизирована с точки зрения скорости выполнения. Интегрирование всех интегралов, входящих в выражения (слишком громоздкие, чтобы их приводить), производилось с обязательным разбиением на интервалы, заданные сеткой высот, и использованием техники адаптивного шага внутри этих интервалов.

Разработанное программное обеспечение, содержит вычисление и визуализацию весовых функций, т.е. производных вида

$$w_x^i(h) = \frac{\partial W_i^{calc}}{\partial x}, \quad (4)$$

где x - любой из восстанавливаемых параметров. Набор весовых функций позволяет судить о том, насколько удачно выбран тот или иной спектральный интервал для восстановления того или иного профиля атмосферного параметра. Идеальной является ситуация, когда набор весовых функций в выбранном наборе спектральных интервалов имеет максимумы во всех узлах высотной сетки, примерно равную абсолютную величину этих максимумов и равномерную плотность распределения этих максимумов по высоте. Острота этих максимумов позволяет судить о высотном разрешении метода восстановления профилей, которое, кроме всего прочего, еще зависит от спектрального разрешения моделируемого спектра. Таким образом,

рассмотрение набора весовых функций позволяет судить о зондирующих способностях того или иного Фурье-спектрометра с точки зрения высотного разрешения. Удачный выбор спектрального интервала с хорошим набором весовых функции позволяет проводить восстановление высотных профилей без использования второго слагаемого в целевой функции (3). Разработанное программное обеспечение позволяет использовать первое слагаемое целевой функции в следующем виде:

$$F = \sum_{i=1}^M g_i^2 \left(\frac{W_i^{calc}}{W_i^{obs}} - \frac{W_i^{obs}}{W_i^{calc}} \right)^2, \quad (5)$$

где g_i - веса, определенные в соответствии с набором весовых функций, назначение которых уравнивать влияние каждого узла высотной сетки на целевую функцию. В некоторых случаях это позволяет ускорить процесс восстановления высотных профилей.

Последний параграф второй главы посвящен описанию программного обеспечения FIRE-ARMS, созданного в рамках данной работы.

Третья глава содержит результаты, полученные при применении разработанных в данной работе методов к обработке спектров IMG/ADEOS, измеренных в 1996-1997 гг.

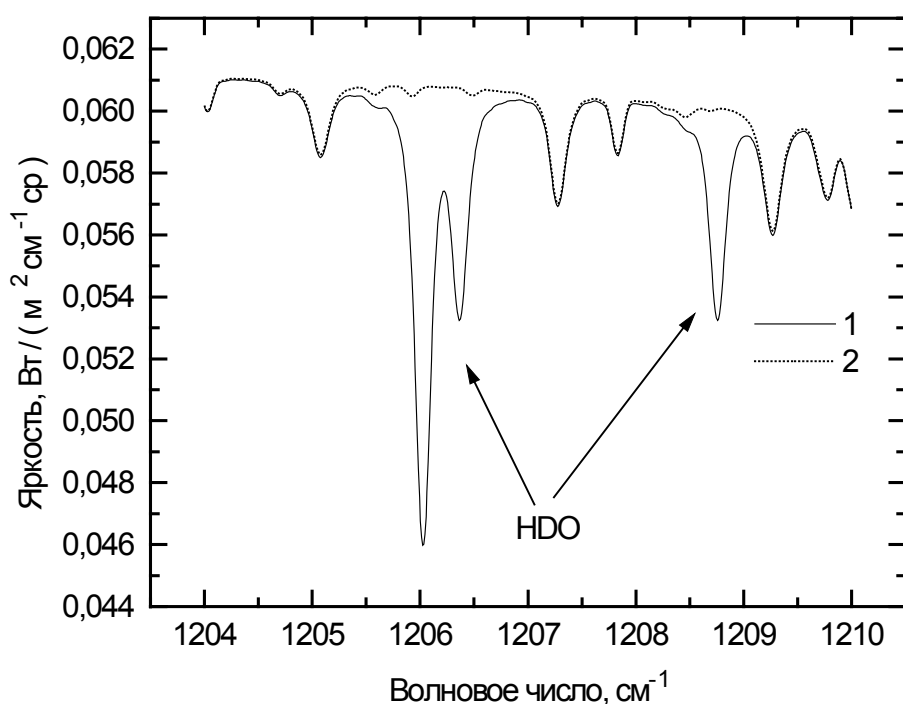


Рис.1. Идентификация линий, принадлежащих изотопу HDO. Кривая 1 – модельный спектр уходящего теплового излучения Земли, вычисленный с учетом спектральных линий всех изотопов, включенных в HITRAN; кривая 2 – модельный спектр, вычисленный с учетом спектральных линий всех изотопов, за исключением линий принадлежащих изотопу HDO.

Возможность программного обеспечения использовать любой набор из 85 изотопомеров составляющих атмосферу газов при моделировании спектров, а также возможность сравнивать модельные спектры с измеренными позволили легко идентифицировать в спектрах IMG особенности (спектральные линии или группы линий) принадлежащие тем или иным изотопомерам, которые не перекрываются спектральными линиями других молекул. Так были идентифицированы линии HDO, H_2^{18}O , $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ и $^{13}\text{CO}_2$. Спектральные линии HDO оказались достаточны для определения полного содержания данного изотопомера в атмосферном столбе. Пример идентификации линий принадлежащих изотопимеру HDO показан на Рис.1.

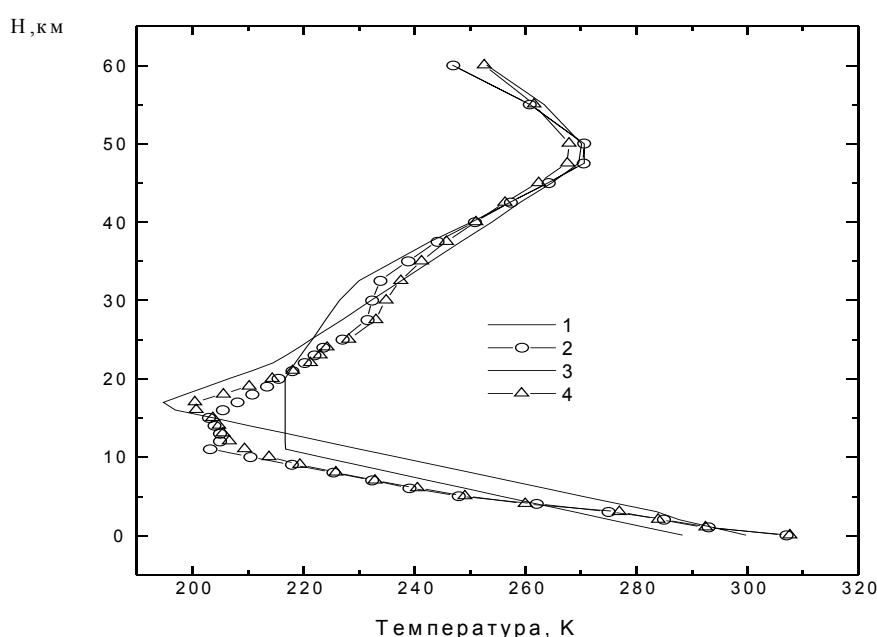


Рис. 2. Восстановление температурного профиля из различных начальных состояний. 1 – температурный профиль из усредненной модели US standard; 2 – восстановленный профиль, для восстановления которого профиль 1 использовался в качестве начального приближения; 3 – тропическая модель атмосферы; 4 – восстановленный профиль, для восстановления которого профиль 3 использовался в качестве начального приближения.

В качестве начальных приближений, в работе использовались стандартные усредненные модели атмосферы. Моделирование спектров проводилось со спектральным разрешением, характерным для прибора IMG (0.1 см^{-1}). Для восстановления профилей температуры традиционно используется спектральный интервал $660 - 900 \text{ см}^{-1}$, в котором поглощения излучения происходит преимущественно диоксидом углерода, содержание которого в атмосфере предполагается хорошо известным. После подбора нескольких узких ($\sim 5 \text{ см}^{-1}$) спектральных интервалов были проведены тестовые восстановления вертикальных профилей температуры из модельных спектров, при расчете которых использовалась иная атмосферная модель, чем та, которая

использовалась в качестве начального приближения. Например, из модельного спектра, построенного на основе тропической модели, восстанавливался температурный профиль при использовании атмосферы средних широт в качестве начального приближения. Были проведены тестовые восстановления температурного профиля из одного и того же спектра IMG, но в качестве начальных приближений использовались различные стандартные атмосферы. Результат показан на Рис.2. Итерационный процесс при восстановлении температурного профиля сходится к единственному решению из различных начальных приближений. Причем, при восстановлении профиля температуры из спектров с разрешением 0.1 см^{-1} нет нужды в регуляризирующем слагаемом целевой функции (3). Следует особо отметить, что качественное восстановление профиля температуры является необходимым условием восстановления профилей или полного содержания любых атмосферных составляющих.

Анализ ошибок восстановления профилей температуры проводился по двум направлениям. Во-первых, была использована оценка ковариационной матрицы ошибок предложенная в [22], которая представляет собой обращение гессиана целевой функции (3). Во-вторых, по выборке зондовых измерений (около 60) профилей температуры, концентраций воды и озона из тропического пояса были смоделированы спектры, а затем из этих спектров восстанавливался температурный профиль с использованием тропической атмосферной модели в качестве начального приближения. Отклонения восстановленного профиля от заданного использовались для построения ковариационной матрицы. Ковариационные матрицы полученные двумя разными способами имеют один порядок величины и ошибки восстановления температуры не превышают 0.3K для температуры поверхности, 1.2K для нижней тропосферы. Погрешность определения излучательной способности поверхности в рассмотрение не бралось.

Весовые функции для молекулы воды имеют размытые широкие максимумы и поэтому без привлечения априорной информации оказалось возможным восстанавливать только сглаженные по высоте профили водяного пара. Более простой, но не менее актуальной является задача определения полного содержания водяного пара в атмосферном столбе. Для решения этой задачи в данной работе была реализована возможность варьирования профиля как целого при подгонке измеренного и расчетного спектров. Данная возможность реализована как первая итерация алгоритма восстановления профиля, все последующие уточняют профиль с помощью градиентного метода. Для восстановления профиля водяного пара использовался рад спектральных полос основного изотопомера молекулы воды в области $1160 - 1210 \text{ см}^{-1}$.

Другим важным парниковым газом является метан и в данной работе проведен поиск приемлемого спектрального интервала и других условий восстановления профиля данного газа. Космический мониторинг метана особенно актуален для контроля его эмиссии в районах добычи нефти и газа, а также при его транспортировке. Наиболее подходящим с точки зрения набора весовых функций оказался интервал $1300 - 1308 \text{ см}^{-1}$. На Рис.3 показан профиль метана, восстановленный из спектра, полученного прибором IMG над Западной Сибирью в январе 1997г. Там же показан профиль начального приближения (модель US standard) и профиль, полученный в работе [23] в ходе самолетных измерений над Западной Сибирью зимой 1992 г.

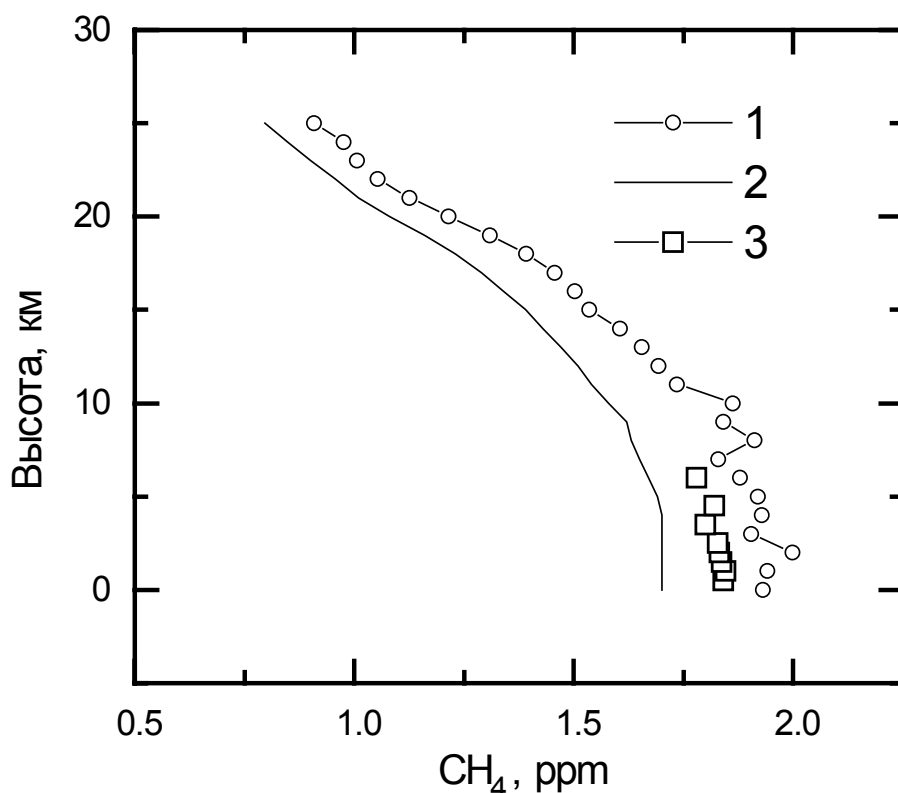


Рис 3. Высотные профили метана: 1- восстановленный из спектра IMG (1997г.), 2 – начальное приближение (зима средних широт), 3 – самолетные измерения (1992г.).

Для восстановления полного содержания HDO использовался спектральный интервал $1204 - 1210 \text{ см}^{-1}$. Сначала восстанавливались профиль температуры и профиль водяного пара. Затем задавался начальный профиль водяного пара по литературным данным о вертикальном распределении HDO [24] и при подгонке спектров интервала $1204-1210 \text{ см}^{-1}$ варьировался как целое профиль воды. После подгонки спектров вычислялось отношение полного содержания водяного пара полученное в последнем случае к той же величине полученной при восстановлении профиля водяного пара. Указанное отношение, умноженное на естественную распространенность HDO заданную в спектральной базе HITRAN, и дает полное содержание HDO в столбе воздуха. Результаты находятся в согласии с данными, полученными путем прямого измерения [24]. На Рис.4 приведено широтное распределение относительного содержания дейтерия в атмосфере, которое определяется как

$$\delta D = \left(\frac{(HDO/H_2O)}{(HDO/H_2O)_{SMOW}} - 1 \right) \times 1000, \quad (6)$$

где (HDO/H_2O) – концентрация молекулы HDO, отнесенная к концентрации всех изотопомеров воды, индекс SMOW (Standard Mean Ocean Water) относится

к океанской воде и соответствует естественной распространенности изотопмера.

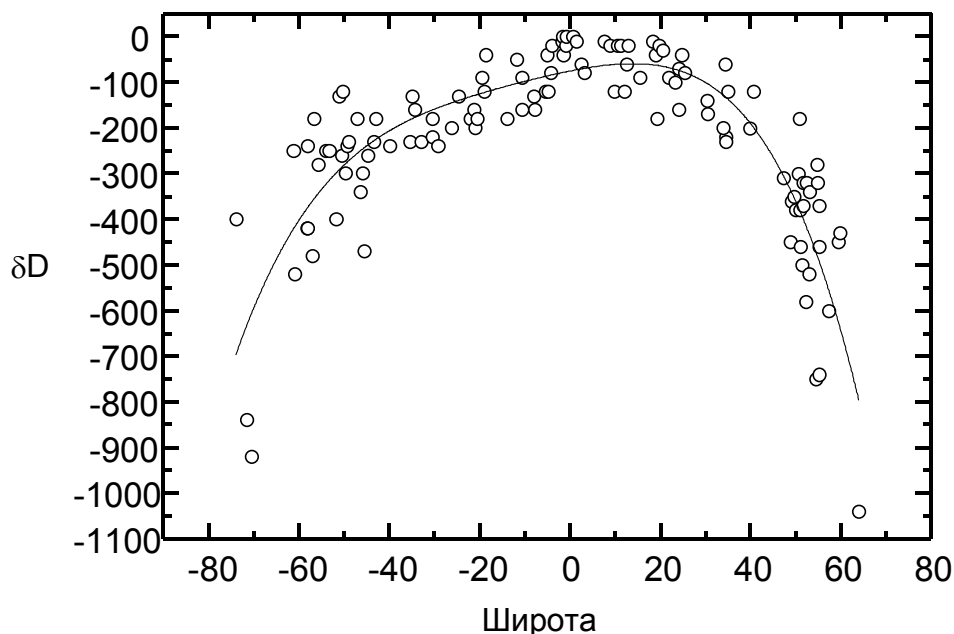


Рис. 4. Широтное распределение относительного содержания дейтерия в атмосфере, восстановленное из спектров IMG/ADEOS, полученных над тихоокеанским регионом.

С помощью FIRE-ARMS был проведен сравнительный анализ набора весовых функций для спектрометра IMG, для планируемого к запуску Европейским Космическим Агентством прибора IASI на борту спутника METOP-1 [26], а также для гипотетического прибора со спектральным разрешением 0.05 см^{-1} . Сравнение проводилось для полосы метана $1300 - 1308 \text{ см}^{-1}$. Если для спектрального разрешения IMG набор весовых функций имеет максимумы на различных высотах в интервале $0 - 10 \text{ км}$, то для спектрального разрешения прибора IASI, имеющего спектральное разрешение порядка 0.5 см^{-1} , все весовые функции сливаются в две функции с двумя максимумами на различных высотах. Гипотетический же прибор дает еще более разрешенную по высотам структуру максимумов весовых функций.

С помощью программного обеспечения FIRE-ARMS и спектров IMG, полученных над пустыней Сахара, проанализировано влияние отраженного от поверхности Земли теплового излучения атмосферы для поверхностей с излучательной способностью характерной для пустыни. Показано, что пренебрежение вторым слагаемым в (1) может приводить к ошибкам восстановления температуры поверхности порядка 0.1 К и температуры воздуха в тропосфере порядка 4 К . На Рис.5 показаны спектры, вычисленные с учетом и без учета отраженного излучения для тропической модели атмосферы и модели излучательной способности поверхности соответствующей такой экосистеме как пустыня. На рисунке видно характерное поведение крыльев слабых линий. Данная особенность наблюдается во многих спектрах, полученных прибором IMG/ADEOS над пустыней Сахара.

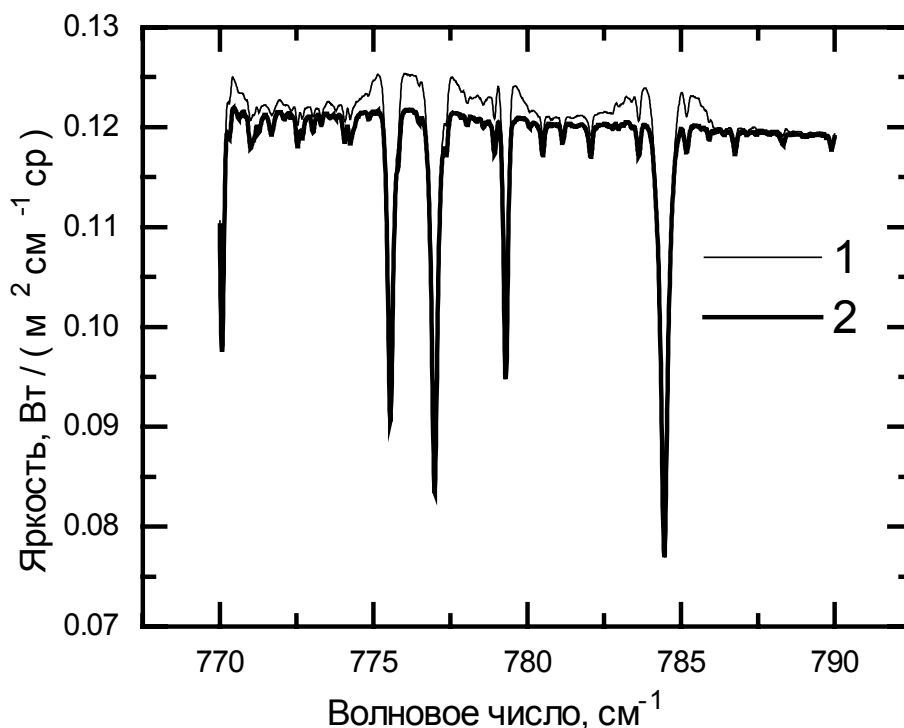


Рис. 5. Спектры, вычисленные с учетом отраженного излучения (1) и без учета отраженного излучения (2).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан и программно реализован универсальный метод восстановления вертикальных профилей атмосферных параметров по спектрам высокого спектрального разрешения, полученным космическими Фурье-спектрометрами, регистрирующими тепловое излучение в надир.
2. В наблюдаемых в надир спектрах IMG идентифицированы спектральные особенности, принадлежащие таким изотопомерам, как HDO, H₂¹⁸O, ¹²C¹⁶O¹⁸O, ¹³CO₂.
3. Разработан метод определения полного содержания молекулы HDO и относительного содержания HDO по отношению ко всем изотопомерам воды в атмосферном столбе.
4. Получено широтное распределение относительного содержания HDO над океаном по данным наблюдений IMG/ADEOS зимой 1996-1997 гг.
5. Разработан метод восстановления высотных профилей метана по спектрам уходящего теплового излучения, зарегистрированным прибором IMG/ADEOS.
6. Сделана оценка влияния отраженного теплового излучения атмосферы от поверхности Земли на спектры уходящего в космос излучения и связанных с этим погрешностей восстановления температуры поверхности.
7. Создано интерактивное программное обеспечение FIRE-ARMS с дружественным пользовательским интерфейсом, в котором реализованы методы разработанные в рамках данной работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.И.Захаров, В.Е.Прокопьев, В.М.Шмелев, К.Г.Грибанов. Устойчивость современного температурного состояния Земли. – Томск, 1991. – 16с. (Препринт Томского научного центра СО АН СССР)
2. V.I.Zakharov, V.M.Shmelev, K.G.Gribanov. Thermal nonstability of power and wide CO₂ laser beam in atmosphere // Proceedings of Int. School Seminar on Nonequilibrium Processes in Gases and Low Temperature Plasma. – Minsk, 1992. – стр. 109.
3. В.И.Захаров, В.М.Шмелев, В.Е.Прокопьев, К.Г.Грибанов. Температурный гомеостаз Земли // Отчет НИКИЭТ. - Москва, 1991. – С. 1-65.
4. В.И.Захаров, В.М.Шмелев, В.Е.Прокопьев, К.Г.Грибанов. Влияние полосы прозрачности атмосферы 8-13 мкм на устойчивость теплового состояния Земли // Атомная энергия. – 1992. – Т. 72. – Вып. 1. – С. 98-106.
5. V.I.Zakharov, V.M.Shmelev, K.G.Gribanov, V.E.Prokop'ev. Influence of Atmospheric Transparency Window 8-13 mm on Thermal Stability of the Earth Atmosphere // Proceedings of ASA Colloquium. – Reims, 1993. – p.39.
6. V.I.Zakharov, K.G.Gribanov, V.M.Shmelev, M.V.Falko. Phenomenon of Explosive Resonance Absorption of CO₂ Laser Radiation by Atmospheric Carbon Dioxide and Water Vapour // SPIE Proceedings. – 1994. – Vol. 2205. – p. 199.
7. К.Г.Грибанов, В.И.Захаров. Радиационные режимы атмосферы Земли с учетом пороговых особенностей поглощения уходящего излучения в окне прозрачности 8-13 мкм // Вычислительные технологии. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 1994. – Т. 3. – Вып. 8. – С. 62-71.
8. V.I.Zakharov, K.G.Gribanov, V.M.Shmelev, A.A.Chursin, N.Husson, V.F.Golovko, and V.I.G.Tyuterev. Temperature dependence of atmospheric transparency function in field of 400-5000 cm⁻¹ and model of explosive greenhouse effect // Proceedings of the 5th Workshop on ASS/FTS, Tokyo, Japan, Nov.30th-Dec.2nd, pp 419-445, 1994.
9. V.I.Zakharov, K.G.Gribanov, M.V.Falko, V.F.Golovko, A.A.Chursin, A.V.Nikitin, N.Husson, N.A.Scott, V.I.G.Tyuterev. Temperature dependence of molecular atmospheric transmission function in field of 2-400 mm and the Earth radiation balance // Proceedings of the 7th Global Warming Int. Conference, April 1-3, Vienna, Austria, p.58, 1996.
10. K.G.Gribanov, V.I.Zakharov, D.Spaenkuch, W.Doehler, and J.Gueldner. Retrieval of Atmospheric CH₄ Profile Using EISAR Data in the Range 1250-1350 cm⁻¹ // Proceedings of the XII International Symposium-School on High Resolution Molecular Spectroscopy, Petergof, July 1-5, p.110, 1996.
11. V.I.Zakharov, K.G.Gribanov, M.V.Falko, V.F.Golovko, A.A.Chursin, and V.I.G.Tyuterev. Molecular Atmospheric Transmittance Function in the Range of 2-400 μm and Earth Radiation Balance // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 1997. – Vol. 57. – No. 1. – pp. 1-10.
12. V.I.Zakharov, A.G.Bordiugov, K.G.Gribanov, A.Dvorkovich, V.G.Krupkin, V.M.Shmelev, I.P.Novikov. Monitoring of CH₄ Emission over Russian Ecosystems Using IMG/ADEOS Data // Proceedings of the 10th Meeting on Optical Engineering in Israel, Jerusalem, Israel, March 2-6, 1997.
13. V.I.Zakharov, V.M.Shmelev, and K.G.Gribanov. Limit Cycles of the Equatorial Radiation Regime of the Earth and ENSO // Proceedings of the 8th Global Warming Int. Conference, New York, USA, May 26-29, 1997.

14. V.I.Zakharov, A.G.Bordiugov, K.G.Gribanov, A.Dvorkovich, V.G.Krupkin. Natural and Antropogenic Fractions of CH₄ Emission Over Siberian Ecosystems // Proceedings of the 1997 Joint Assemblies of IAMAS/IAPSO, Melbourne, Australia, July 1-9, 1997.
15. S.A.Tashkun, V.F.Golovko, A.A.Chursin, T.Aoki, M.Fukabori, V.I.Zakharov and K.G.Gribanov. Retrieval Algorithm for Atmospheric Constituents Using High-Resolution Spectra of Satellite Interferometer Sounding // SPIE Proceedings. – 1998. – Vol. 3583. – pp. 2-7.
16. K.G.Gribanov, V.I.Zakharov, S.A.Tashkun, and V.I.G.Tyuterev, A new generation user-friendly software for infrared atmospheric remote sensing from space // 8th International Workshop on Atmospheric Science from Space Using High Resolution Fourier Transform Spectrometry at Meteo France in Toulouse: Proceedings. - Toulouse, 1998.
17. K.G.Gribanov, S.A.Tashkun, V.I.Zakharov, V.I.G.Tyuterev "An advanced user-friendly system for atmospheric calculations including constituents profile retrievals", ALPS 99 Symposium, Meribel, France, 18-22 January 1999.
18. К.Г. Грибанов, В.И. Захаров, С.А. Ташкун, Пакет программ FIRE-ARMS и его применение в задачах пассивного ИК-зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Том. 12. – № 4. – С.372-378.
19. К.Г. Грибанов, В.И. Захаров, О возможности мониторинга содержания Н₂О/Н₂О в атмосфере используя наблюдения из Космоса уходящего теплового излучения // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т.12. - №9. – С. 1-3.
20. Грибанов К.Г., Бреон Ф.М., Захаров В.И., Эффект отраженного поверхностью ИК-излучения, наблюдаемый в эмиссионных спектрах атмосферы при зондировании Земли из космоса // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т.13. – №12. – С. 1119-1122.
21. K.G.Gribanov. Algorithms and software development for task of greenhouse gases monitoring from space // SPIE proceedings. – 2000. – Vol. 4063. – pp. 280-286.
22. V.Zakharov and K.Gribanov. Techniques development for atmospheric parameters retrieval using IMG/ADEOS spectra: IMG/ADEOS PI report, 1999. – EORC, NASDA, Japan.
23. V.I. Zakharov, R. Imasu, K.G. Gribanov. HDO and ¹³CO₂ Retrieval from IMG Spectrum Data // Proceedings of 9th International Workshop on Atmospheric Science from Space Using High Resolution Fourier Transform Spectrometry, May 22-24, 2000, Kyoto, Japan
24. Gribanov K.G., Zakharov V.I., Tashkun S.A., Tyuterev V.I.G. A New Software Tool for Radiative Transfer Calculations and its application to IMG/ADEOS data // JQSRT. – 2001. – Vol. 68. – No.4. – pp. 435-451.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Radiation Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios: Reports of Working Group I and III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, forming part of the IPCC Special Report to the first session of the Conference of the Parties to the UN framework Convention on Climate Change / Cambridge Univ. Press. – 1995. – 339p.

2. Кондратьев К.Я. Природные и антропогенные изменения климата. – Л.: Наука, 1986. – 56с.
3. Углекислый газ в атмосфере: Пер. с англ. / Под ред. В. Баха, А. Крейна, А.Берже, А.Лонгетто. – М.: Мир, 1987. – 534 с.
4. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 280с.
5. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы (обзор) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1989. – Т.26. – №5. – с.451-472.
6. Menzel W.P., Purdom J.F.W. Introducing GOES-I: The first of a new generation of geostationary operational environmental satellite // Bull.Amer.Meteor.Soc. – 1994. – Vol.75. – pp.757-781.
7. N.Nakajima, H.Kobayashi, H.Saji. IMG Current Status and Mission Operation Plan, Proceedings of The Second ADEOS Symposium/Workshop, pp. 389 – 397, March 10-14, 1997, Yokohama, Japan.
8. C.D. Rogers. Characterization and Error Analysis of Profiles Retrieved From Remote Sounding Measurements // Journal of Geophysical Research. – 1990. – Vol.95. – No. D5. – pp.5587-5597.
9. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы со спутников. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 280с.
10. Покровский О.М., Тимофеев Ю.М. Общий статистический подход к решению обратных задач атмосферной оптики // Метеорология и гидрология. – 1972. – № 1. – стр.52 – 59.
11. W.L. Smith, H.M. Woolf, and H.E. Revercomb. Linear simultaneous solution for temperature and absorbing constituent profiles from radiance spectra // Applied Optics. – 1991. – Vol.30. – No.9. – pp. 1117-1123.
12. X.L.Ma, T.J.Schmit, W.L. Smith. A Nonlinear Physical Retrieval Algorithm – Its Application to the GOES-8/9 Sounder // Journal of Applied Meteorology. – 1999. – Vol. 38. – pp.501-513.
13. U.Amato, V.Cuomo, I.De Fies, F.Romano, C.Serio and H.Kobayashi. Inverting for geophysical parameters from IMG radiances // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1999. – Vol.37. – No. 3. – pp.1620-1656.
14. P.Eriksson. Analysis and comparison of two linear regularization methods for passive atmospheric observations // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105. – No. D14. – pp. 18157-18167.
15. L.S.Rothman, C.P.Rinsland, A.Goldman, S.T.Massie, D.P.Edwards, J.-M. Flaud, A.Perrin, C.Camy-Peyret, V.Dana, J.-Y.Mandin, J.Schroeder, A.McCann, R.R.Gamache, R.B.Wattson, K.Yoshido, K.V.Chance, K.W.Jucks, L.R.Brown, V.Nemtchinov and P.Varanasi. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 edition // JQSRT. – 1998. – Vol. 60. – pp. 665-710.
16. Report of the Experts Meeting on Aerosols and their Climatic Effects, Ed. by A.Deepak and H.E.Gerber, Williamsburg, Virginia, 28-30 March 1983.
17. S.A.Clough, F.X.Kneizis, and R.W. Davies. Line shape and the water continuum // Atmos.Res. – 1989. – Vol.23. – pp. 229-241.
18. R. Rodrigues, K.W. Juks, N. Lacome, Gh. Blanquet, J.Walrand, W.A.Traub, B.Khalil, R.Le Doucen, A.Valentin, C.Camy-Peyret, L.Bonamy and J.-M. Hartman. Model, Software, and Database For Computation of Line-Mixing Effects in Infrared Q Branches of Atmospheric CO₂ – I. Symmetric Isotopomers. // JQSRT. – 1999. – Vol. 61. – No. 2. – pp. 153-184.

19. K.W.Jucks, R.Rodrigues, R.Le Doucen, C.Clavesu, W.A.Traub, J-M.Hartmann. Model, software, and database for computation of line-mixing effects in infrared Q branches of atmospheric CO₂: II Minor and asymmetric isotopomers // JQSRT. – 1999. – Vol. 63. – pp. 31-48.
20. R.H.Norton and R.Beer. New apodizing functions for Fourier spectrometry // J.Opt.Soc.Am. – 1976. – Vol. 66. – No. 3. – pp.259-264.
21. М. Мину. Математическое программирование: Пер. с фр. – М.: Наука, 1990. – 488с.
22. L.Garand. Sensitivity of Retrieved Atmospheric Profiles from Infrared Radiances to Physical and Statistical Parameters of the Data Assimilation System // Atmosphere-Ocean. – 2000. – Vol. 38. – pp. 431-455.
23. T.Nakazawa, S.Sugawara, G.Inoue, T.Machida, S.Maksyutov, and H.Mukai, Aircraft measurements of the concentrations of CO₂, CH₄, N₂O, and CO and the carbon and oxygen isotopic ratios of CO₂ in the troposphere over Russia // JGR. – 1997. – Vol. 102. – No. D3. – pp. 3843-3859.
24. K.Rozansky et al. Vertical distribution of deuterium in atmospheric water vapor // Tellus. – 1982. – Vol.34. – pp.135-141.
25. W.Dansgaard. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – Vol.16. – No. 4. – pp.436-468.
26. F.Henault, D.Miras, D.Scheidel, and F.Bouboult. Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) performance evaluation // 6th International Workshop on Atmospheric Science from Space Using Fourier Transform Spectrometry, October 3-5, 1995, San Juan Capistrano, USA.